

Autonomer Verkehr und die Kapazität von Straßen

Peter Wagner,
Institut für Verkehrssystemtechnik und
TU Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr

Von Fahrerassistenz bis Fahrerlos – Wie automatisiertes Fahren den Straßenverkehr verändern wird!
12. Sommerakademie der TU Graz

8 September 2016

Knowledge for Tomorrow



Vor ein paar Jahren...

- Waren Autonome Fz (AV) Science Fiction



Quellen:

- Google.com
- Autobild.de
- Apfeltalk.com
- Heise.de



Autonomes Fahren...

- Interessantes und sehr weites Feld
- 2014 durfte ich mit anderen Kolleg/innen an einem Buch (open access) mitarbeiten,

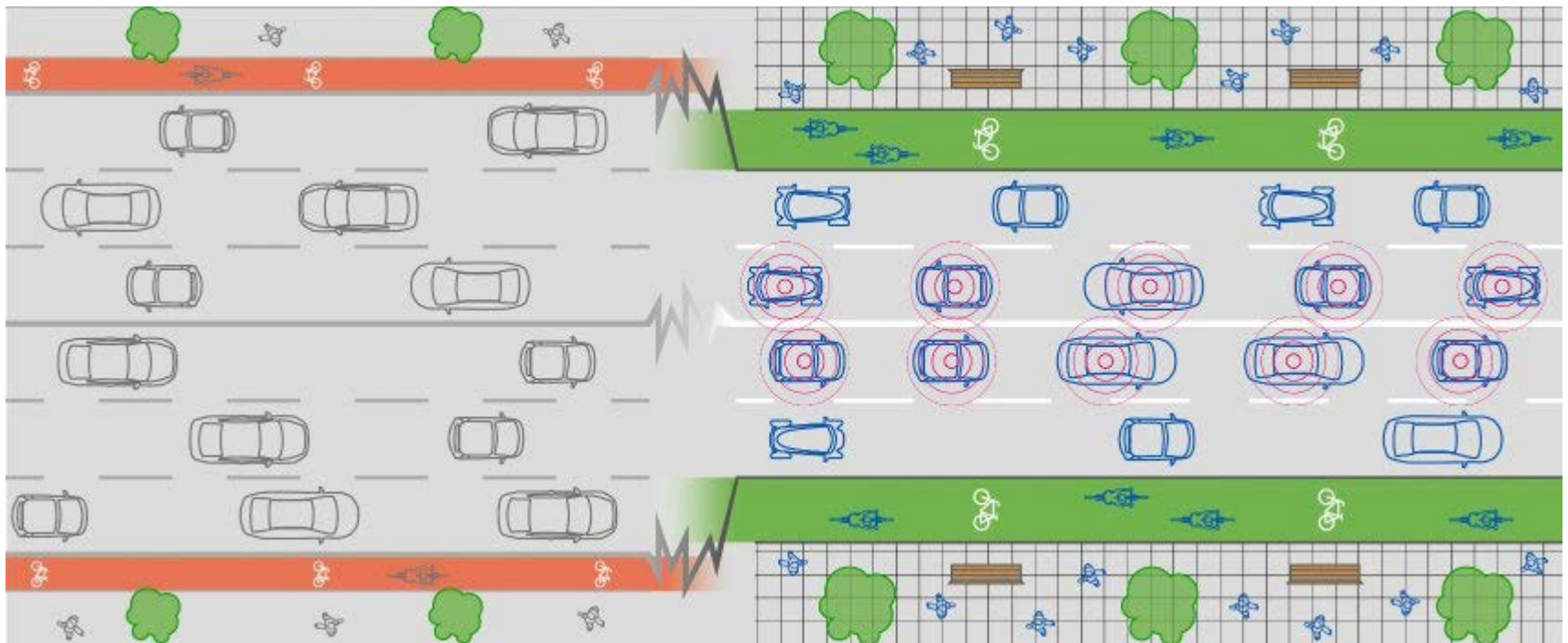
<http://www.springer.com/de/book/9783662458532>

- 32 Kapitel, 29 Autor/innen zu sechs Themengebieten
 - Mensch und Maschine
 - Mobilität
 - Verkehr
 - Sicherheit
 - Recht und Haftung
 - Akzeptanz



Aber: hier & heute nur Kapazität

- Das hier ist ein anderer dieser Träume. Aus:
<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonomes-fahren-chance-fuer-die-stadt-a-997393.html>

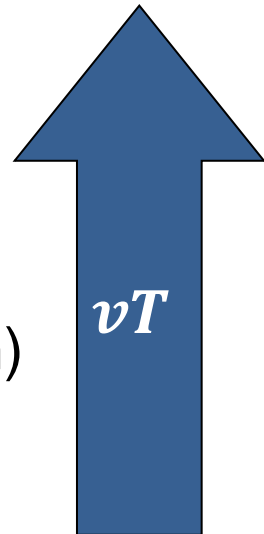
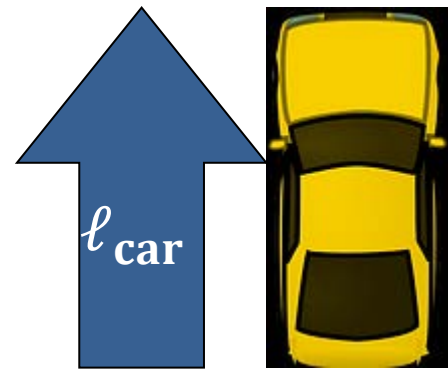


Eigentlich ist es ganz einfach 😊!

- Ein Fahrzeug braucht Platz: $L = vT + \ell_{\text{car}}$
- v Geschwindigkeit, T Zeitlücke, ℓ_{car} Fahrzeuglänge
- Somit: $\frac{1000}{L} = \frac{1000}{vT + \ell_{\text{car}}} =: k$ passen auf einen Kilometer
- Verkehrsstärke $q = k v$ (ohne Beweis), also $q = \frac{1000 v}{vT + \ell_{\text{car}}}$
- Ein paar Zahlen: $\ell_{\text{car}} = 6\text{m}$, $T = 2\text{s}$, $v = 22\text{m/s}$ ($\approx 80\text{ km/h}$)
- ➔ $k = 20\text{ Fz/km}$ und $Q = \max\{q_i\} = 1584\text{ Fz/h}$

Was geht autonom? (H. Winner)

- $T = 0.5\text{s}$ ➔ $k = 87\text{ Fz/km}$ und $Q = 6886\text{ Fz/h}$
- $T = 0$ ➔ $k = 133\text{ Fz/km}$ und $Q = 13200\text{ Fz/h}$

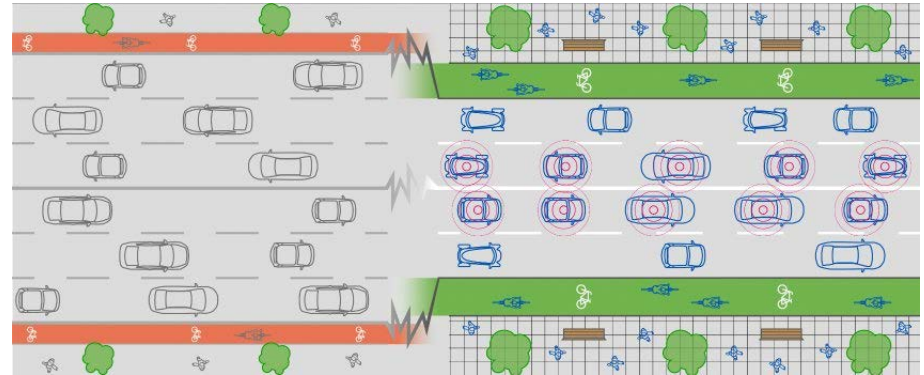


Source: pixabay.com



Da geht was...

- Oder?
- Aber: Forscher/innen sind sich nicht einig
- Einige Kolleg/innen haben argumentiert, dass Q kleiner wird (Marcos Papageorgiou auf der ITSC 2015, z.B.)
- In meinem Buchkapitel in Autonomes Fahren wird in allen untersuchten Szenarien Q größer (Simulation)
- Es gibt andere Arbeiten von mir, wo Q kleiner wird
- Leider: es hängt ziemlich viel an T , aber nicht alles
- Im Folgenden werde ich ein paar Argumente zusammentragen, was passieren könnte



Kritik

- Nur auf die Abstände zu schauen ist statisch
- Es fehlt: ist ein Zustand $q \approx Q$ stabil?
- Offensichtlich nicht, aber warum eigentlich nicht?
- (Offensichtlich: wenn es stabil wäre, gäbe es keine Staus)

- Woher kommt die Instabilität?
- Aus der mikroskopischen Dynamik
(Fahrzeugfolgeprozess und Spurwechsel)
- Das ist kompliziert, und leider wissen wir nicht genug darüber
- Weder empirisch, noch experimentell



Zeitlücken, empirisch

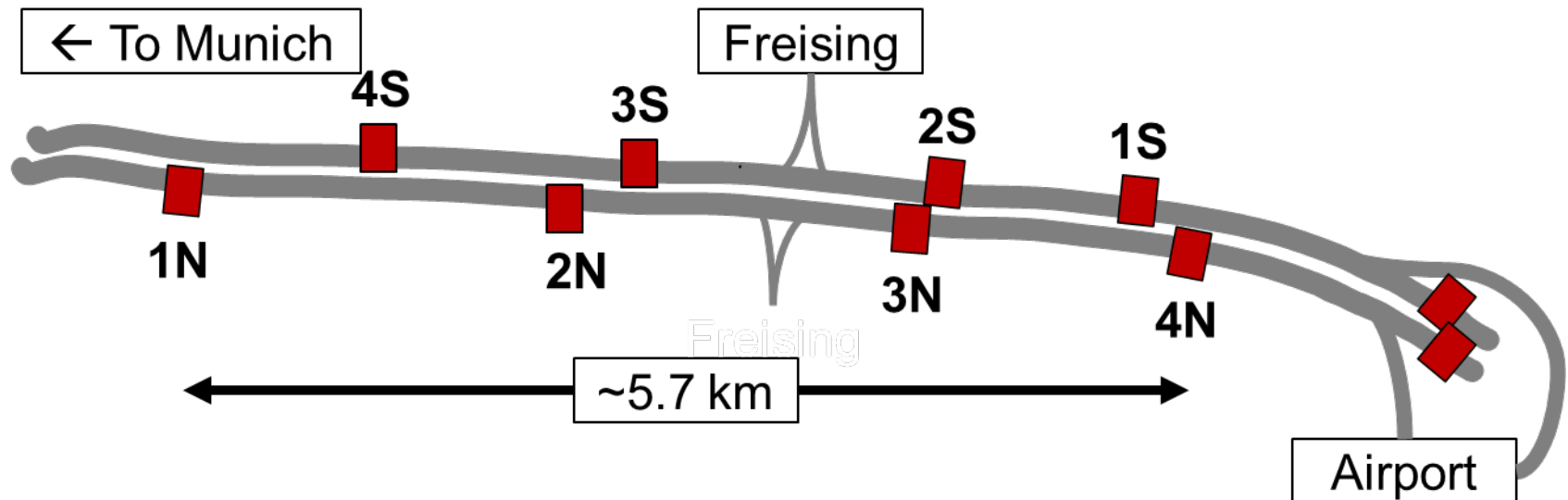


Knowledge for Tomorrow



Daten

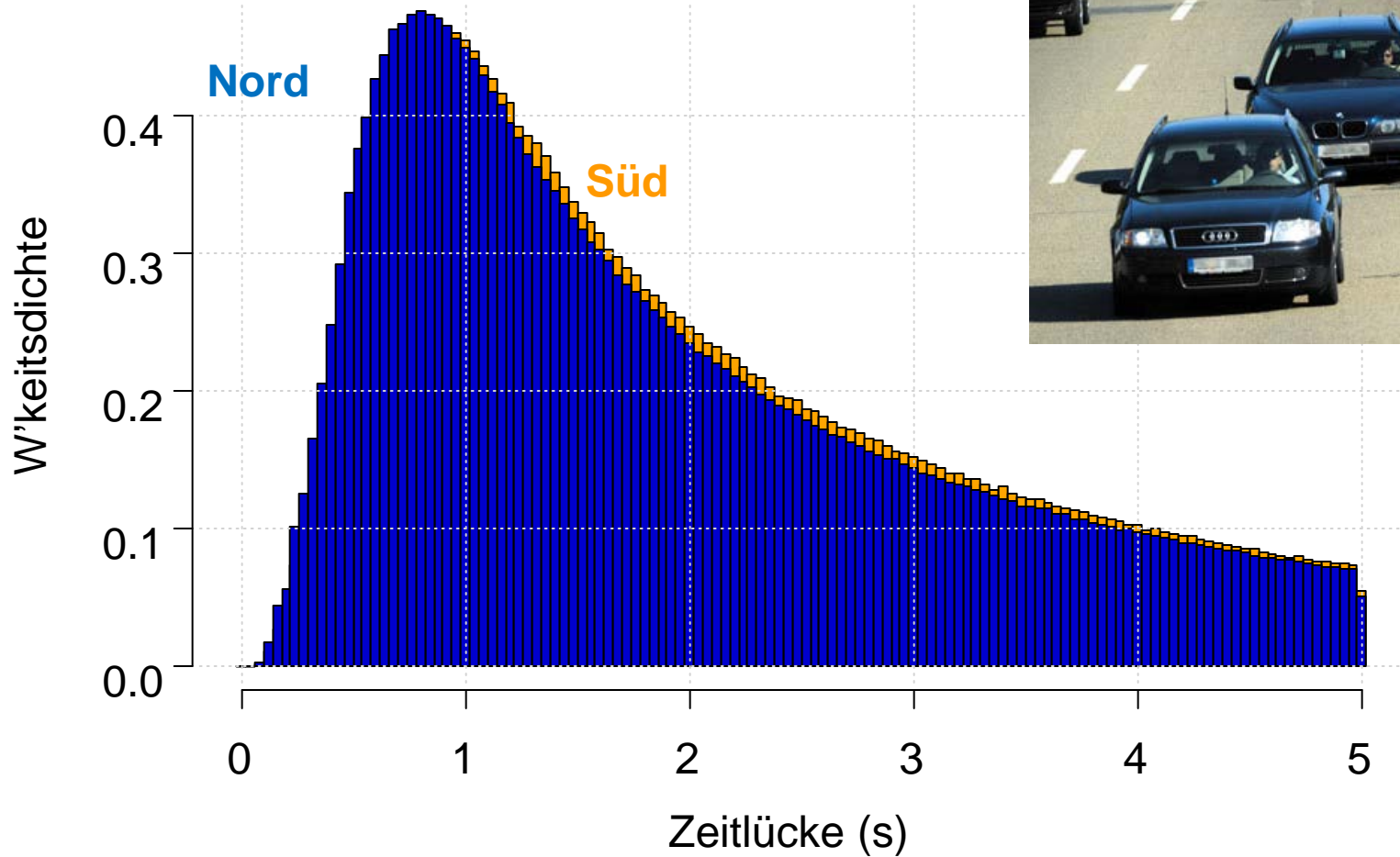
- Einzelfahrzeugdaten von der A 92 (München → Flughafen)



- 28 Detektoren an 2×5 Querschnitten
- ~14 Mio Daten vom Sep 2015
- Was ist die erwartete Zeitlücke von Menschen?



Erwartungswert der Zeitlücke



Weitere Details

- Quantile der Zeitlücke (in s):

Richtung	Min	25%	Median	75%
Norden	0.06	1.08	2.11	4.5
Süden	0.02	1.15	2.19	4.53

- Maximum der Verteilung bei $T = 0.8$ s (N) und $T = 0.92$ s (S)
- (16 – 18 % der Fahrer/innen bekämen Strafzettel, $T \leq 0.9$ s)
- Ähnliche & viele weitere Ergebnisse (andere Orte & Daten)
- (Eine ganz andere Geschichte, nicht hier & heute.)



Was ist die Zeitlücke?

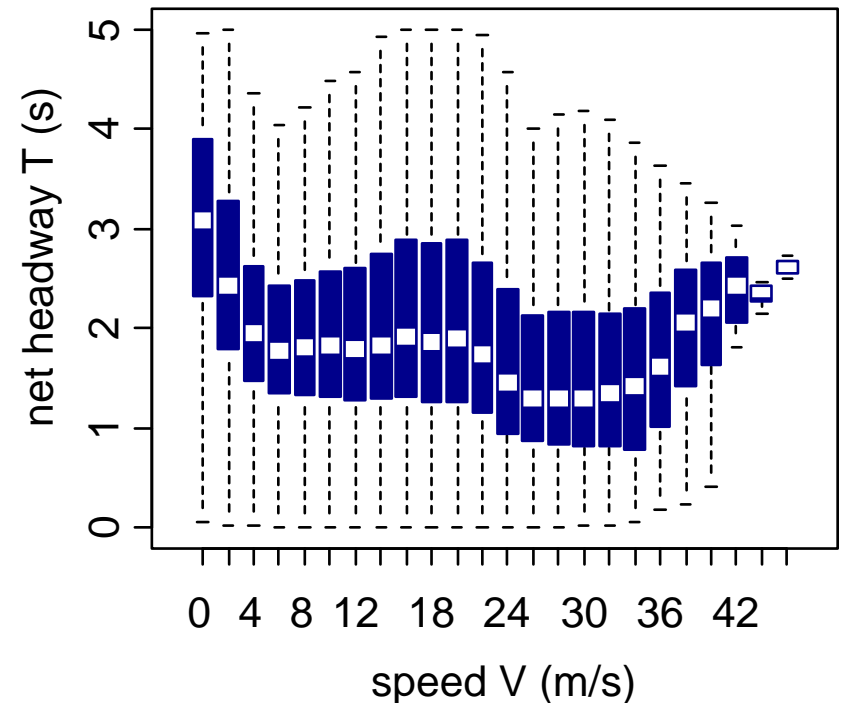
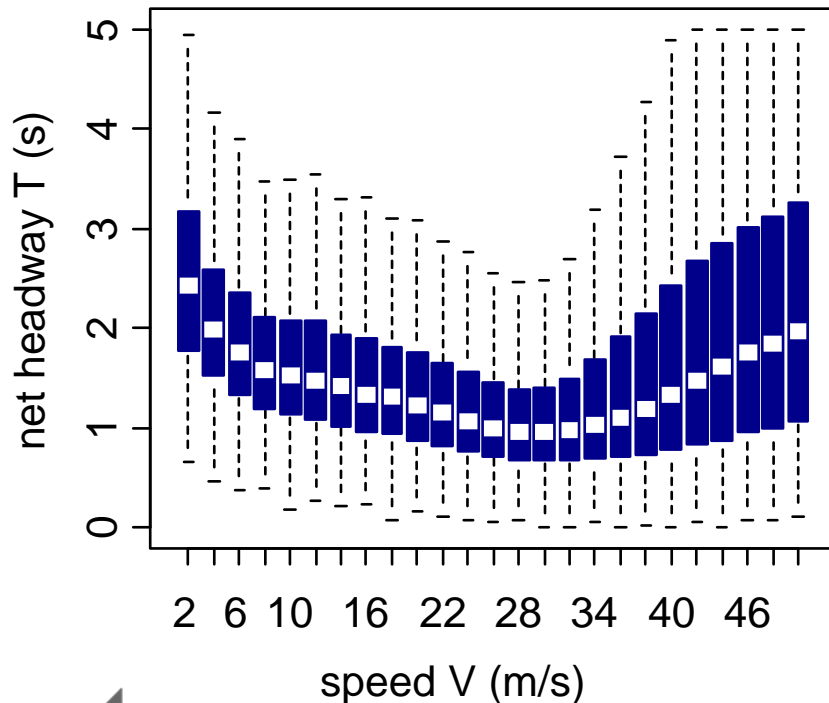
- Der Mittelwert?
- Das Maximum der Verteilung?
- Der Median?

- Breite der Verteilung kommt nicht von der Verschiedenheit der Fahrerinnen (Heterogenität): schon in den Daten eines einzelnen findet sich das:



Trajektorien- vs Detektordaten

- Kein Beweis, sondern nur ein Hinweis
 - Autobahndaten (heterogen)
 - Trajektoriendaten (homogen)



Was ist die Zeitlücke?

- Der Mittelwert?
- Das Maximum der Verteilung?
- Der Median?
- Breite der Verteilung kommt nicht von der Verschiedenheit der Fahrerinnen (Heterogenität): schon in den Daten eines einzelnen findet sich das:
- Liegt an den Geschwindigkeitsschwankungen des Führungsfahrzeuges
- Der hat aber selbst ein Führungsfahrzeug → Fluktuationen sind selbst-generiert



Was macht ein AV?

- Wenn es einem anderen AV folgt, dann mit einer sehr schmalen Zeitlückenverteilung
 - ...mit einem konfigurierbaren Mittelwert.
 - Wenn es einem menschlichen Fahrer folgt...
 - Dessen Geschwindigkeit schwankt,
 - Dann überträgt sich das auf dieses Fahrzeug; im Idealfall wird die Schwankung gedämpft.
- ➔ AV halten kleineren Abstand, und eine kleinere Schwankung in den Abständen als Menschen, Verkehrsfluss wird ruhiger.
- Möglicherweise.



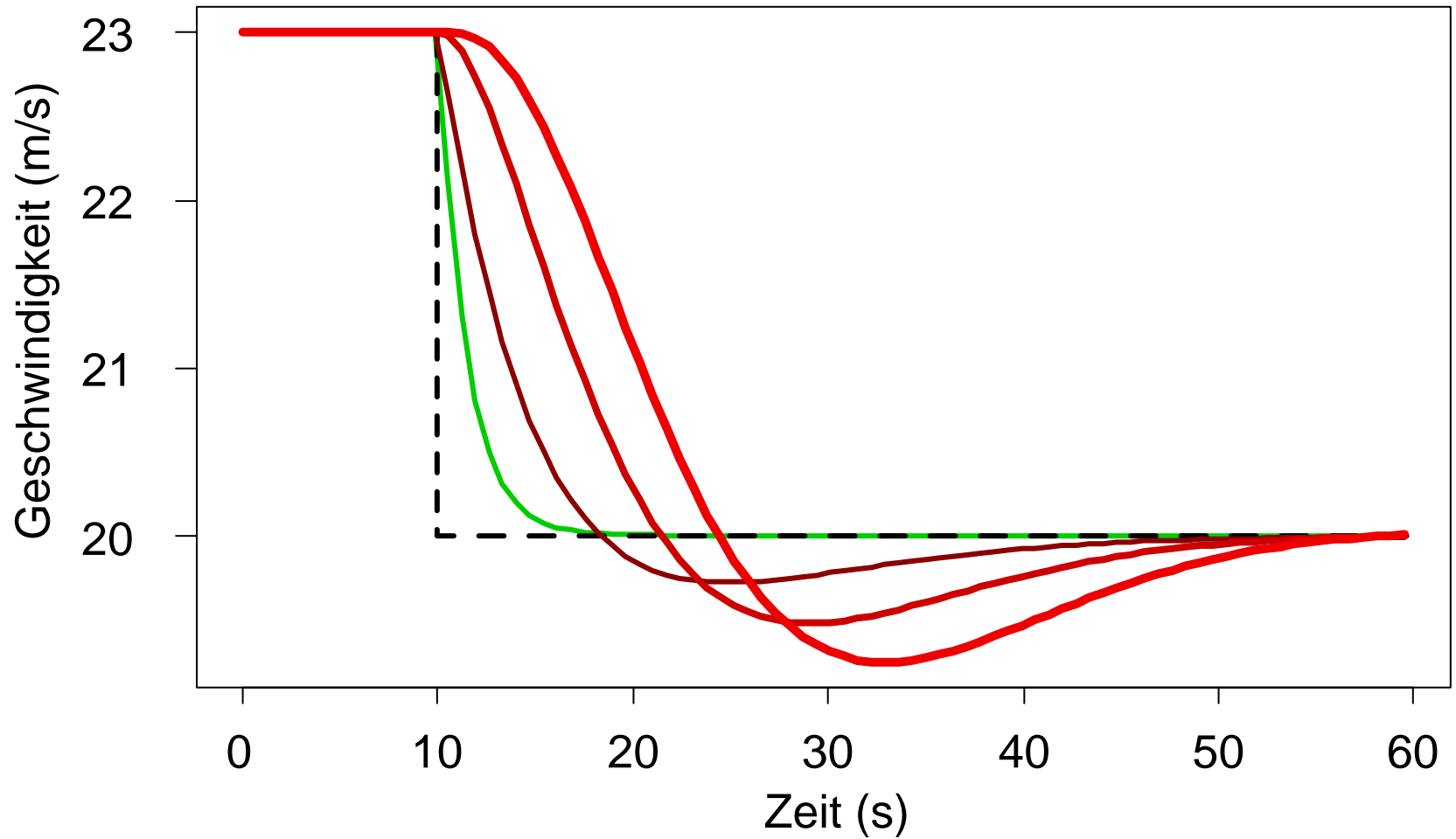
Stabilität



Knowledge for Tomorrow

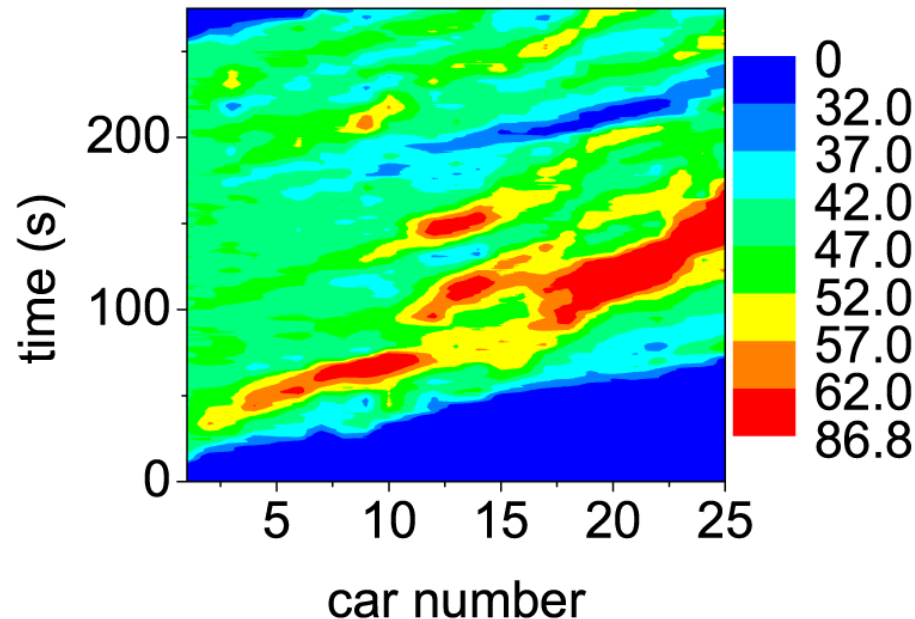


Stabilität – ein Bild



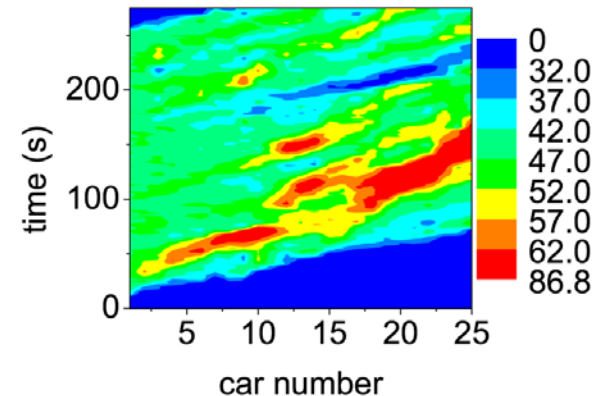
Stabilität – was wissen wir?

- Start mit Gazis et al. Experimente in 1958
- Erstes Modell der Instabilität: Beschleunigung $a = \beta \Delta v(t - r)$
 ➔ Instabilität wegen Reaktionszeit r (Δv : speed difference)
- Einige (viele?) weitere Experimente:
 - Fahrzeuge im Kreis (Bando, Sugiyama, Schadschneider,...)
 - 2014: Jiang et al., 25 Fze auf einer chinesischen Straße



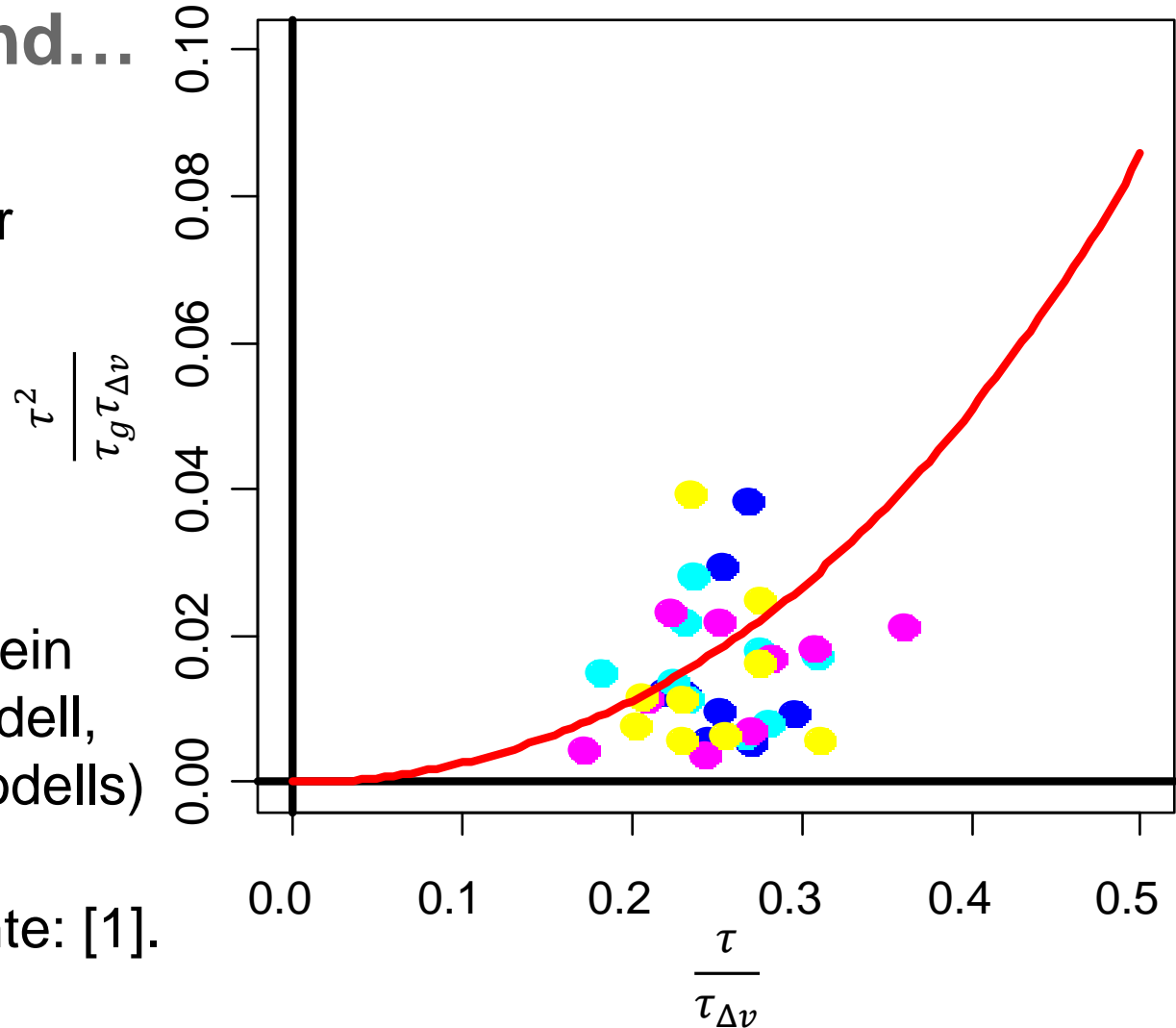
Stabilität – was wissen wir?

- Start mit Gazis et al. Experimente in 1958
- Erstes Modell der Instabilität: Beschleunigung $a = \beta \Delta v(t - r)$
 ➔ Instabilität wegen Reaktionszeit r (Δv : speed difference)
- Einige (viele?) weitere Experimente:
 - Fahrzeuge im Kreis (Bando, Sugiyama, Schadschneider,...)
 - 2014: Jiang et al., 25 Fze auf einer chinesischen Straße
- Impliziert, dass der Prozess des Folgens mitunter instabil ist
- Aber: es gibt keine Garantie, Bando et al mussten lange warten



Fahrer/innen sind...

- ...an der Grenze der Stabilität
- (rote Linie)
- Jeder Kreis ist ein Fahrer in einem Experiment
- Fitten der Daten an ein entsprechendes Modell,
→ Stabilität (des Modells)
- Die ganze Geschichte: [1].

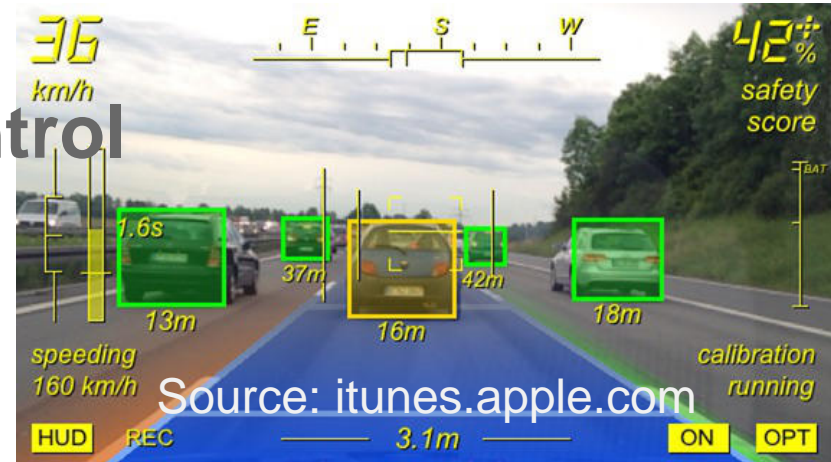


[1] PW, European Physical Journal B **84**, 713-718 (2011)



ACC – Adaptive cruise control

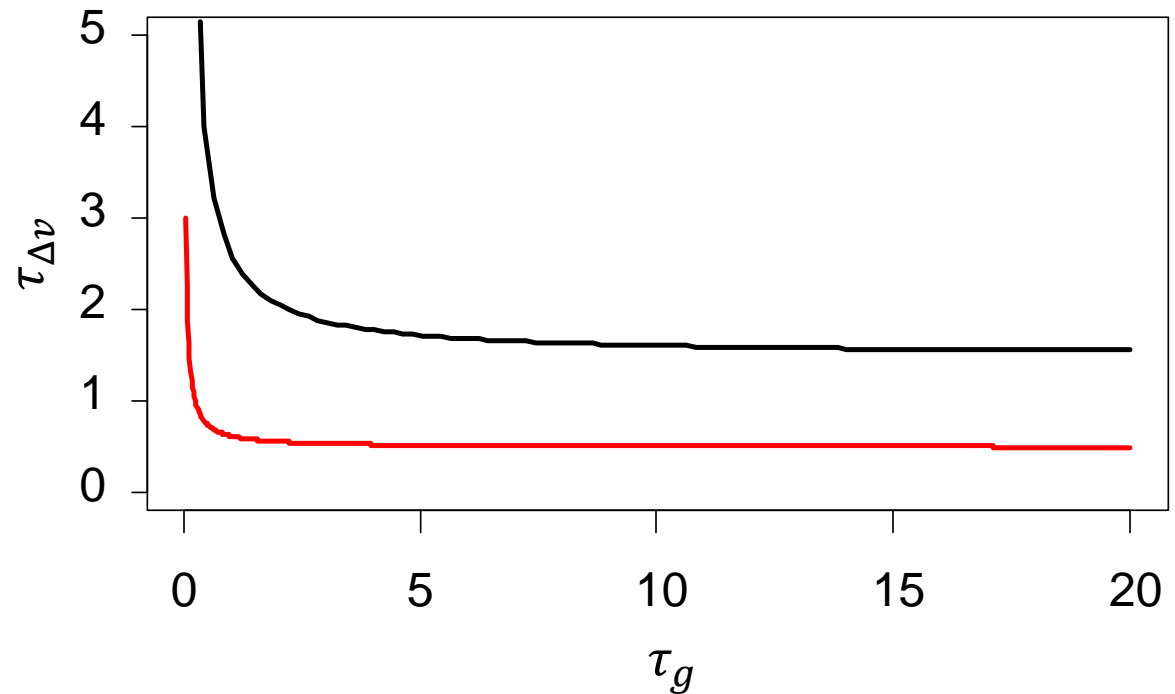
- ACC's sind einfache AV's
- Werden oft mit einer leichten Kolonneninstabilität konfiguriert [2].
- Sind lineare Regler (einige),
- $a = \Delta v / \tau_{\Delta v} - (vT^* - g) / (\tau_g \tau_{\Delta v})$
- g : Nettoabstand, v Geschwindigkeit, gewünschte Zeitlücke T^*
- Ist ein lineares Fahrzeugfolgemodell (Hellys Modell, 1959);
- Kolonnenstabil falls $\tau_{\Delta v} \leq T^* \left(1 + \frac{T^*}{2\tau_g}\right)$, mit $\tau_{\Delta v} \tau_g \approx 20$ s.
- $\tau_{\Delta v} \tau_g \approx 20$: wegen Komfort, macht Ruck \dot{a} und $|a|$ „klein genug“



[2] Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsystem (2011)

Ein Problem: Winners $T^* = 0.5$ s...

- Erfordert sehr kleine τ ; vermutlich wird das so nichts...
- Aber: Menschen tun das die ganze Zeit!
 $T^* = 0.5$ s sind nicht selten...
- Wie?
- CACC
- bessere
Vorausschau
- ...



**Um etwas über Daten zu lernen,
mach' ein Modell!**



Knowledge for Tomorrow



Two headways model

- Modell kann von manuell auf autonom wechseln
- Im Prinzip ist es Hellys Modell, also ACC
- Mensch haben einen Bereich von Zeitlücken $T^* \in [1,2]$ s, die AVs haben alle 1.5 s
- Maschine (ADAS / AV):

$$a' = \frac{\Delta v}{\tau_{\Delta v}} + (g - vT^*)/(\tau_{\Delta v}\tau_g) + \sigma_a \xi$$

- Mensch:
- neue Beschleunigung nur, wenn $|a' - a| > \sigma_a$
- $\sigma_a \xi \in [-0.4, 0.4]$
- Dazu: erzwinge SUMOs Sicherheitsbedingung $v \leq v_{\text{safe}}$



Sicherheit

- Das greift, wenn Zeitlücke in die Nähe von $r = 0.5$ s kommt
- ➔ Modell entspricht SUMO (Gipps oder Krauß) Modell, d.h. die Geschwindigkeit wird durch eine sichere begrenzt:
- Falls $v' = v + a\Delta t > v_{\text{safe}}$ dann erzwinge $v' = v_{\text{safe}}$
- mit
- $$v_{\text{safe}} = -br + \sqrt{(br)^2 + (v + \Delta v)^2 + 2bg}$$
- Parameter b ist eine akzeptable Verzögerung, Modell muss aber b nicht einhalten
- (typischerweise ist $a \geq -b$, aber nicht immer.)
- ➔ keine Unfälle



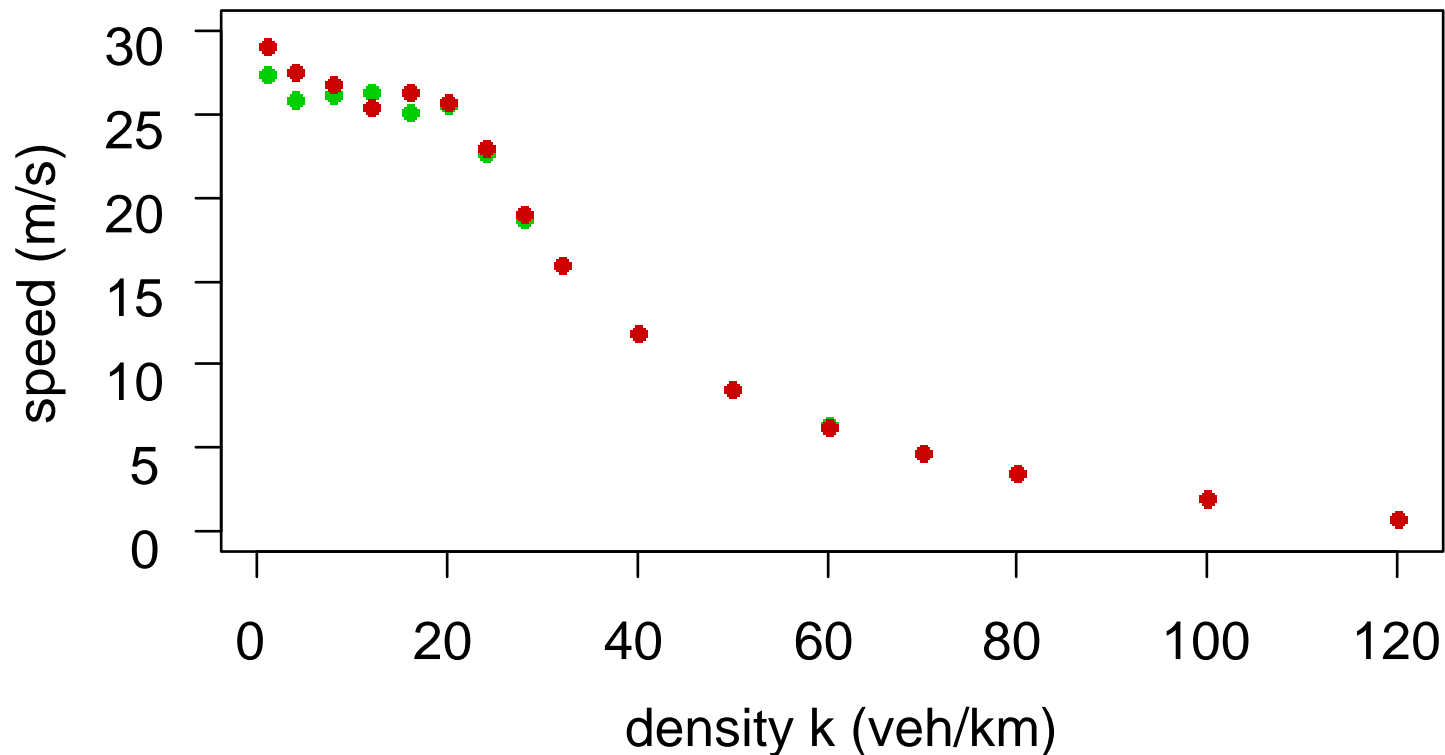
Simulation set-up

- Einspurverkehr, Fahrzeuge fahren im Kreis (periodische Randbedingungen)
- Verschiedene maximale Geschwindigkeiten, Überholen ist möglich: falls das vorausfahrende Fz genug Platz hat, darf Folge-Fz vorbei.
- Variiere Dichte von 0 bis k_{\max} → Fundamentaldiagramm (FD)
- Bedingungen:
 - 200 Fze,
 - 20000 s simulierte Zeit,
 - Statistik nur aus den letzten 15000 s,
 - Zeitschrittweite 0.1 s.
- (Braucht für ein FD weniger als eine Minute)



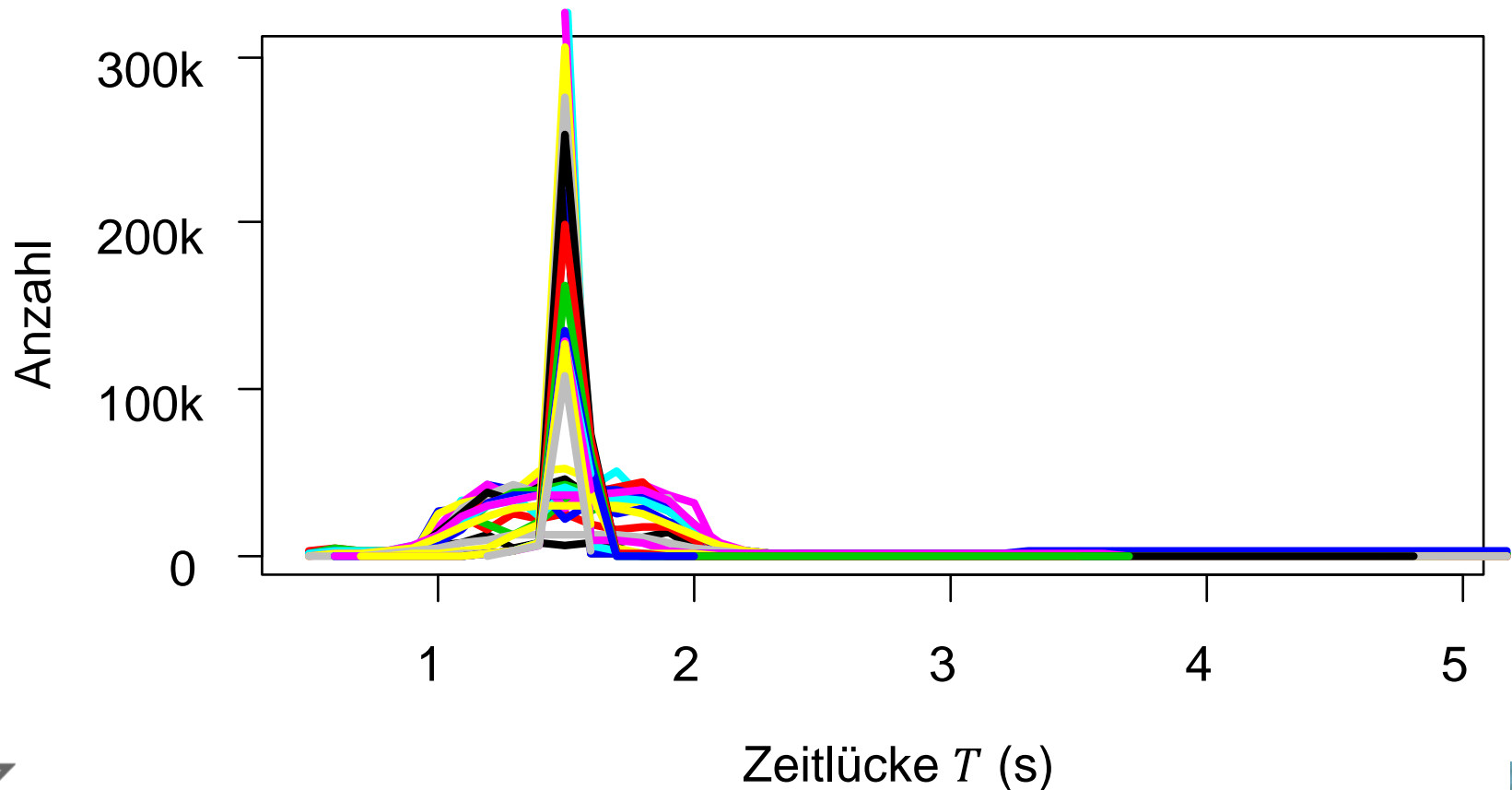
Fundamentaldiagramme

- Für dieses Modell findet man nur geringe Differenzen zwischen AV and HV (red); Beschleunigungsrauschen verändert FD nicht



Zeitlücken?

- Breite der AV-Zeitlücken ist viel kleiner; (nicht überraschend)
- Zeitlückenverteilungen verschieden von empirischen. Sehr sogar.



Was fehlt?

- Bislang haben wir räumlich homogene Systeme untersucht
- Was aber passiert, wenn Fahrzeuge wechseln, von Autonom zu Human?
- Vor allem müssen sie die Zeitlücke wieder auf menschliches Maß reduzieren
- Ganz offensichtlich handelt man sich an so einer Stelle einen echten Engpass ein
- Arbeiten mit Ihno Schrot



Teststrecke Skizze

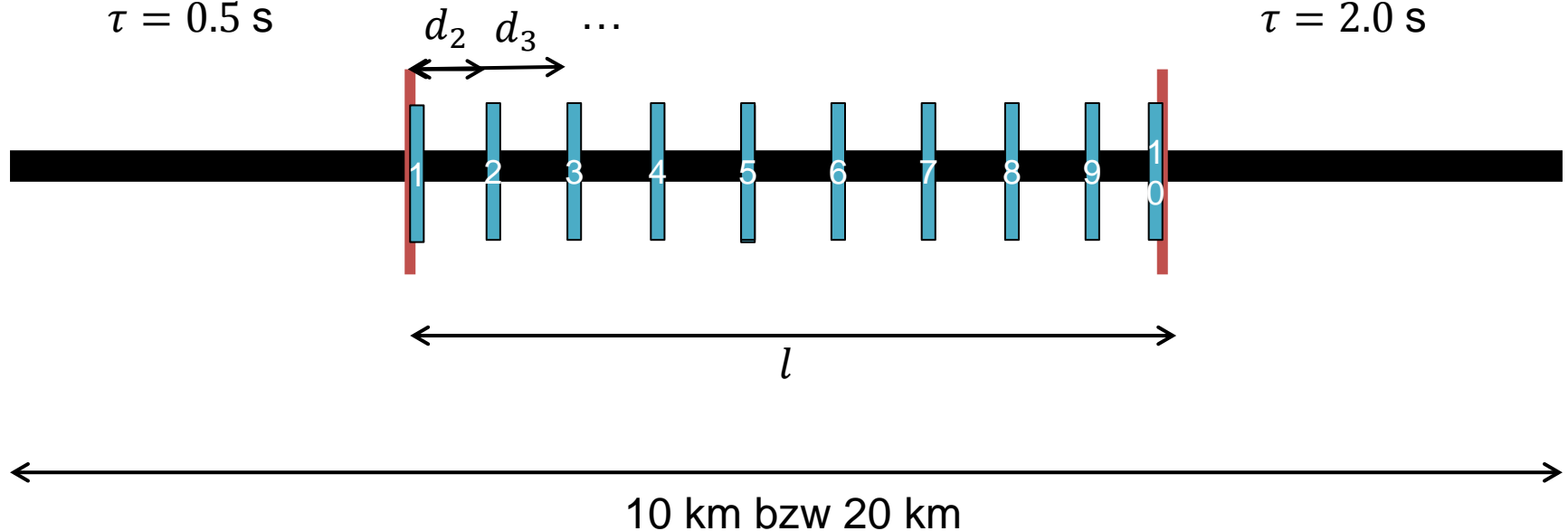
Übergabezone

n Detektoren (äquidistante Abstände)

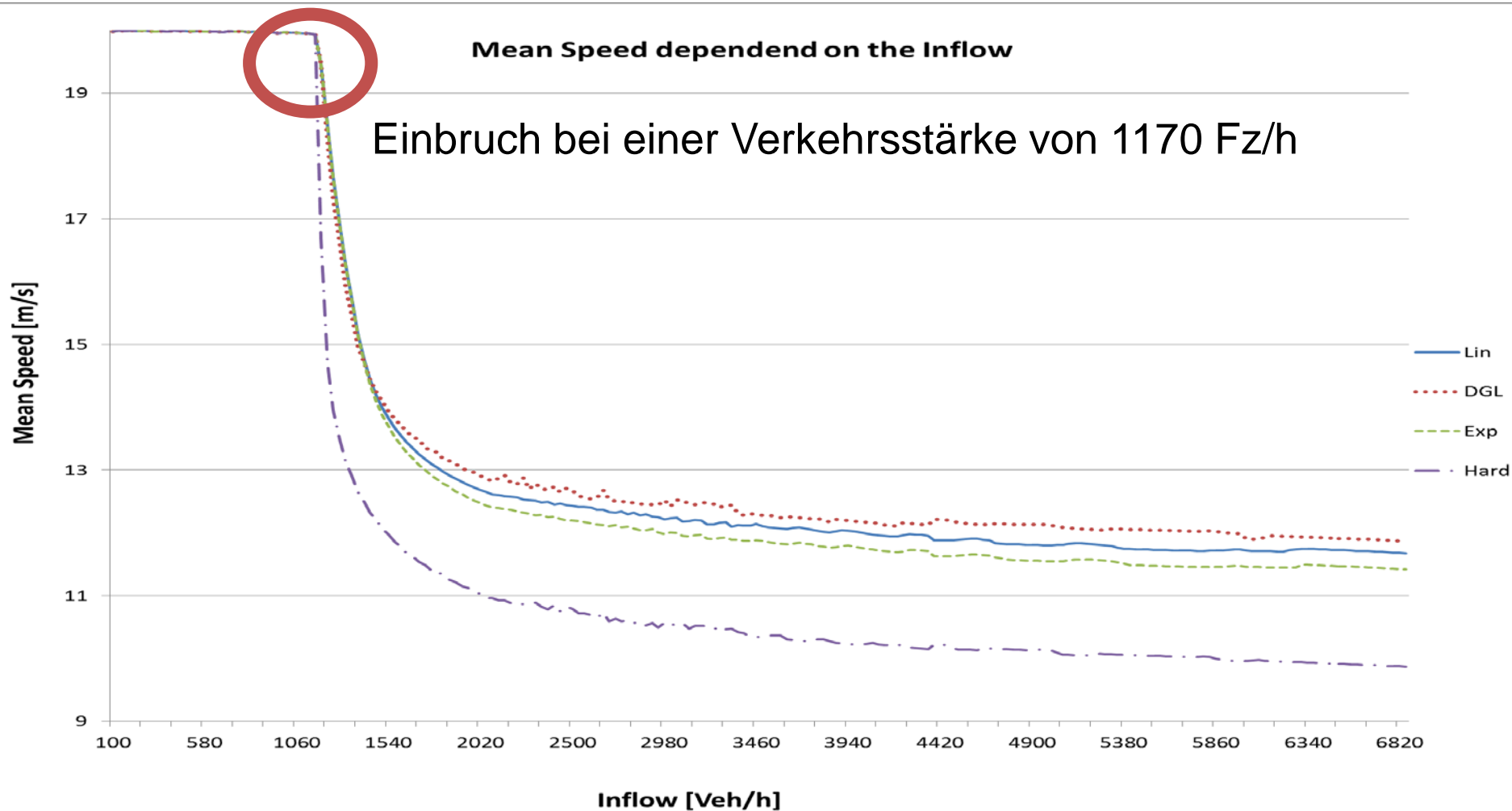
Automatisiertes
Fahren:
 $\tau = 0.5 \text{ s}$

Rückgabe der Kontrolle:
 $\tau = \tau(d)$

Manuelles
Fahren:
 $\tau = 2.0 \text{ s}$

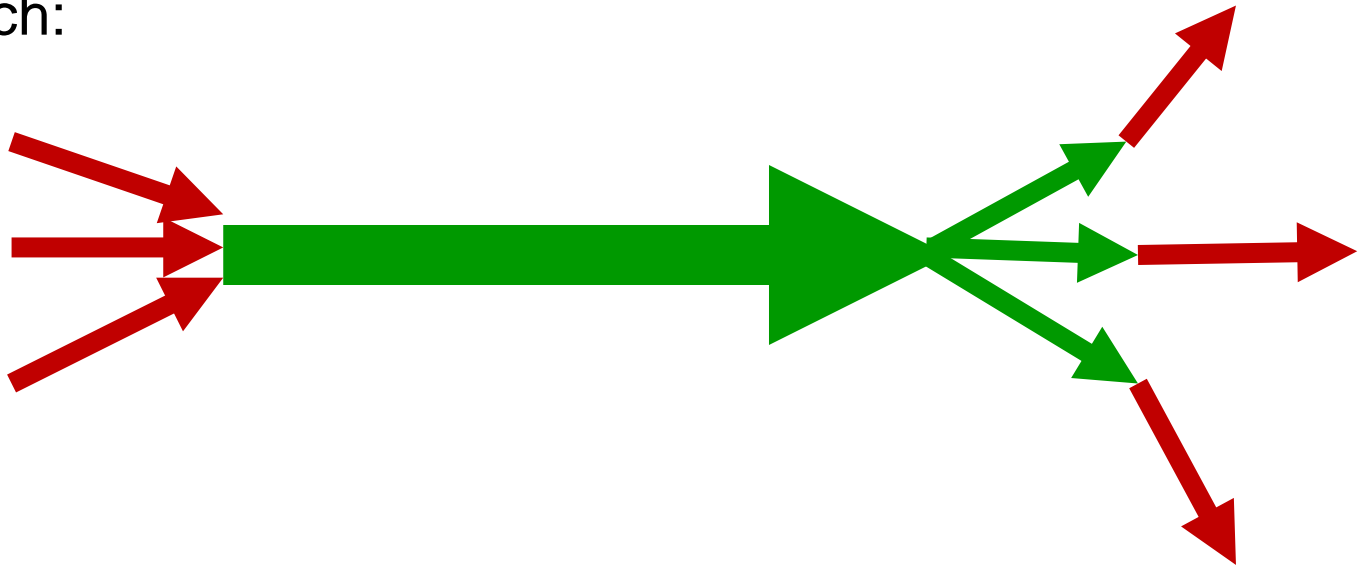


10km Teststrecke: Mittlere Geschwindigkeit



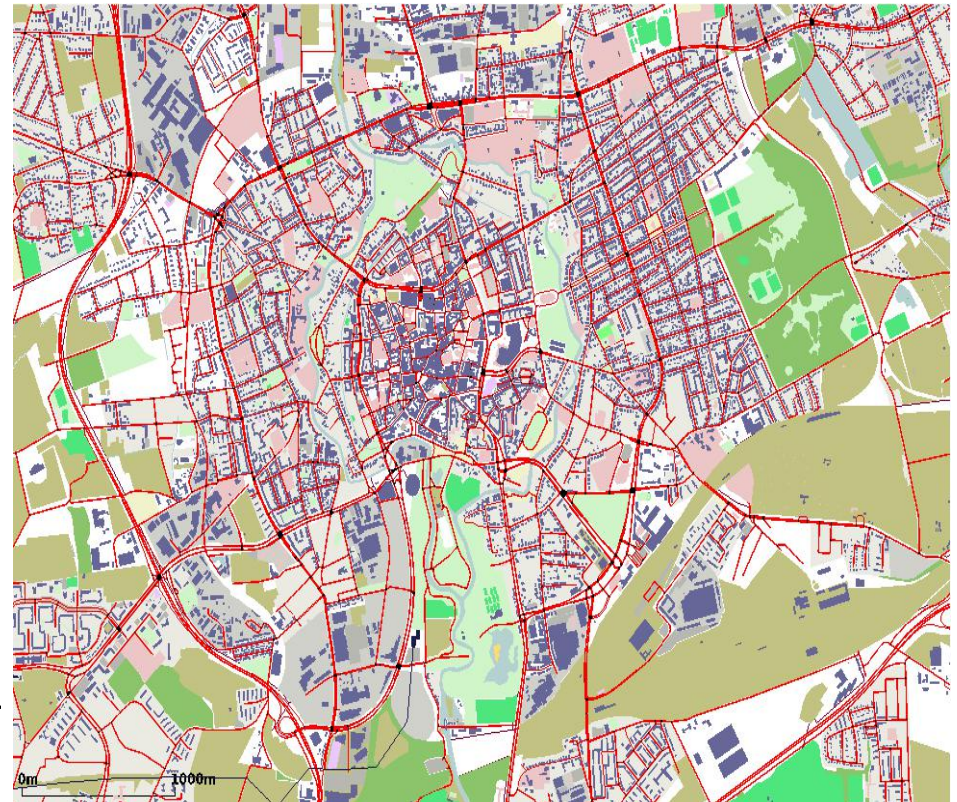
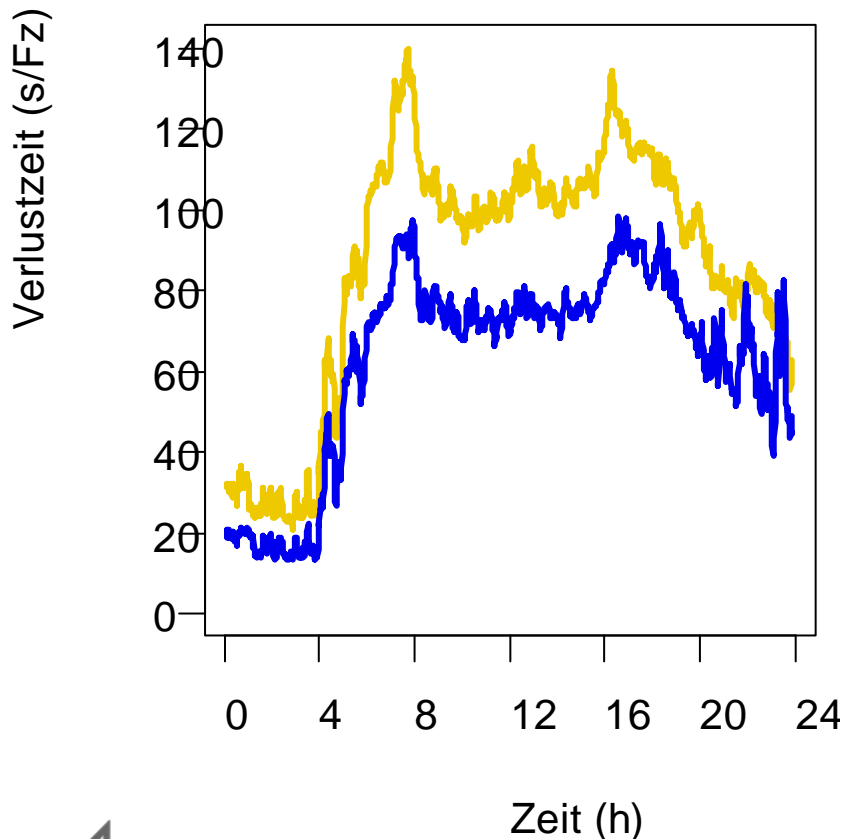
System

- Somit: die Einzelbetrachtung ist nicht falsch, aber man muss es in den Systemkontext stellen
- Strecken auf denen Automatisierung „geht“ gewinnen an Kapazität nur, wenn man das System selbst richtig designt
- Symbolisch:



Autonomes Fahren ohne Änderungen

- Im Buch Autonomes Fahren wird eine Simulation einer großen Stadt beschrieben



Schlussfolgerungen

- Autonomes Fahren kann große Kapazitäten realisieren, wenn kleine T^* erlaubt sind.
- Aktuelle ACC haben Schwierigkeiten mit kleinen $T^* = 0.5$ s
- ACCs sind oft sehr kurzsichtig; das was sie machen, geht oft besser als ein Mensch es könnte
- Einschränkung: was genau in den R & D Abteilungen läuft ist mir nicht bekannt.
- Schwaches Rauschen in der Beschleunigung hat keinen starken Effekt (zumindest im Rahmen des hier verwendeten Modells)
- Stabilität ist nach wie vor ein Thema
- Für die Frage der Kapazität ist vor allem das Gesamtsystem interessant → neue, kreative Lösungen sind hier notwendig

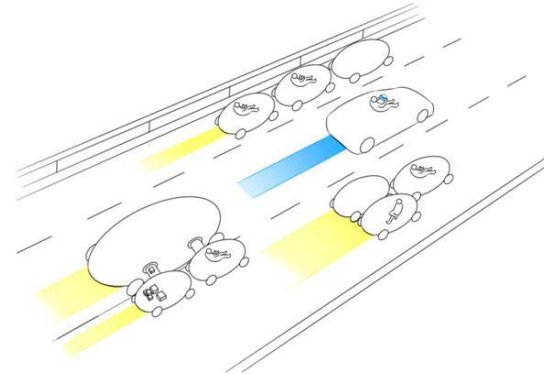


Vielen Dank für's Zuhören...

- Social Cars



- Aus DEM Buch



Autonomer Verkehr und die Kapazität von Straßen

Peter Wagner,
Institut für Verkehrssystemtechnik und
TU Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr

Von Fahrerassistenz bis Fahrerlos – Wie automatisiertes Fahren den Straßenverkehr verändern wird!
12. Sommerakademie der TU Graz

8 September 2016

Knowledge for Tomorrow

